

УДК 621.396

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ АНИЗОТРОПНЫХ СТРУКТУР С БОЛЬШОЙ КИРАЛЬНОСТЬЮ В СВЧ ДИАПАЗОНЕ

А.Л. Самофалов, И.В. Семченко, С.А. Хахомов*Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель*

SIMULATION AND INVESTIGATION OF ARTIFICIAL ANISOTROPIC STRUCTURES WITH HIGH CHIRALITY IN THE MICROWAVE RANGE

A.L. Samofalov, I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov*F. Scorina Gomel State University, Gomel*

В СВЧ диапазоне проведено моделирование киральных свойств образца искусственной среды, состоящей из медных спиралей. Сравнение рассчитанных значений угла поворота плоскости поляризации волны, прошедшей через искусственную структуру, с экспериментальными результатами позволило сделать вывод, что предложенная модель качественно описывает свойства искусственной структуры с большой киральностью в СВЧ диапазоне.

Ключевые слова: композитные среды, киральность, спиральный элемент, поворот плоскости поляризации.

The simulation of chiral properties of a sample of the artificial medium consisting of copper helices in the microwave range has been carried out. Comparison of calculated values of the angle of rotation of the polarization plane of the wave transmitted through artificial structure with the experimental results led to the conclusion that the proposed model qualitatively describes the properties of the artificial structure with a high chirality in the microwave range.

Keywords: composite media, chirality, helical element, the plane of polarization.

Введение

В работе [1] на примере образца, разработанного авторским коллективом из Института физики полупроводников Сибирского отделения РАН, проведено численное моделирование киральных свойств искусственной анизотропной структуры, образованной микроспиральями с углом подъема 53° , формируемыми из напряженных нанопленок [2]–[4]. Показано, что такая искусственная периодическая структура может проявлять значительные киральные свойства в терагерцевом диапазоне частот электромагнитного поля. Получены аналитические выражения для диэлектрической, магнитной и киральной восприимчивостей структуры при условии сильных гиротропных свойств. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов. В итоге сделан вывод, что предложенная модель удовлетворительно описывает свойства искусственной структуры с большой киральностью в ТГц диапазоне.

В предлагаемой статье показана возможность использования данного метода расчета применительно к искусственным материалам в СВЧ диапазоне, что позволяет определить ряд физических параметров этих материалов.

1 Моделирование

Используя аналитическое выражение для киральной восприимчивости из статьи [1], проведем моделирование в СВЧ диапазоне

киральных свойств образцов искусственной среды, состоящей из медных спиралей с параметрами:

1) $N_s = 1$, $r = 6.5 \cdot 10^{-3}$ м, $\alpha = 35^\circ$, $L = 0.05$ м, $H = 0.0288$ м, $d = 9 \cdot 10^{-4}$ м;

2) $N_s = 1$, $r = 4.7 \cdot 10^{-3}$ м, $\alpha = 53^\circ$, $L = 0.05$ м, $H = 0.04$ м, $d = 9 \cdot 10^{-4}$ м,

где N_s – число витков спирали, r – радиус витка, α – угол подъема спирали относительно плоскости, перпендикулярной оси спирали, L – длина медной проволоки (соответствует условию главного частотного резонанса), H – высота спирали (в данном случае она равна шагу спирали), d – диаметр медной проволоки.

Количество спиралей в образцах, толщина и длина проволоки, из которой изготовлены спирали, в обоих случаях одинаковы, при этом спирали с углом подъема $\alpha = 35^\circ$ являются левосторонними, а спирали с $\alpha = 53^\circ$ – правосторонними. Фотографии изготовленных экспериментальных образцов двумерных решеток приведены на рисунках 1–2.

Параметры спирали в образце 1 получены на основании модели молекулярной оптической активности. Нами была проведена аналогия между спиралевидной молекулой и металлической спиралью и использован метод электродинамического подобия. При этом не учитывалась возможная зависимость входного сопротивления металлической спирали от угла подъема.

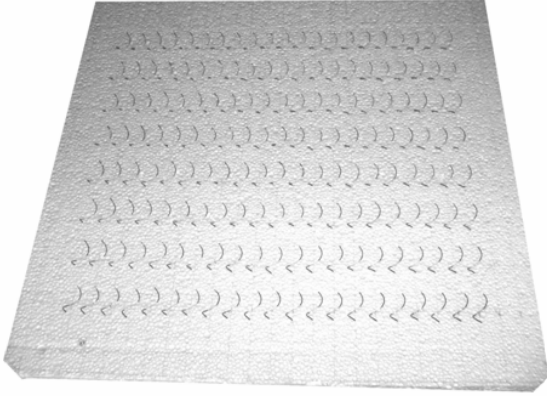


Рисунок 1 – Искусственный образец, содержащий левосторонние одновитковые спирали с углом подъема 35°



Рисунок 2 – Искусственный образец, содержащий правосторонние одновитковые спирали с углом подъема 53°

Угол подъема спирали в образце 2 равен 53 градусам, он получен исходя из аналитической модели, приведенной в работе [5]. На основе этой модели рассчитан оптимальный угол подъема спирали, который гарантирует максимальные значения угла поворота плоскости поляризации. Расчет показал, что для одновитковой спирали оптимальный угол подъема составляет 53 градуса. В работе [5] использована формула для входного сопротивления канонической спирали, состоящей из плоского кругового витка и двух прямолинейных проводников. Варьировалось соотношение между радиусом витка и длиной плеч канонической спирали. Тем самым, зависимость входного сопротивления реальной спирали от угла ее подъема учтена в работе [5] приближенным образом.

Зависимость параметра киральности κ' от частоты для среды с сильными киральными свойствами с учетом его частотной дисперсии имеет вид [1]:

$$\kappa' = \frac{1}{A} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} B \frac{\omega_0^2 - \omega^2 - j\omega \tilde{A}}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \tilde{A}^2} \left(1 + \frac{q\omega r^2}{2} \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \kappa \right),$$

где

$$\frac{1}{A} = \frac{2Ne^2}{\pi m_e} \frac{\tau}{r^2 q^2 + 1}, \quad B = \frac{r^2 q}{2} \omega,$$

$$\tilde{A} = \frac{\rho N_0 N_s e^2}{m_e}, \quad N = N_0 N_s N_h V_h, \quad V_h = \pi r_0^2 L,$$

$$\tau = j \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{\rho}{\pi r^2 S_{np} \sin \alpha} 2\alpha_{me}, \quad N_s = \frac{2\Delta}{r_0}, \quad \Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0 \omega}},$$

где e – заряд электрона, m_e – масса электрона, r – радиус спирали, q – удельное кручение спирали, ω – частота падающего излучения, ρ – удельное сопротивление металла, N_0 – объемная концентрация электронов проводимости в металле, N_s – доля скин-слоя в объеме спирали, r_0 – радиус проволоки, N_h – концентрация спиралей, V_h – объем проволоки, из которой изготовлена одна спираль, τ – коэффициент ослабления поля внутри металла, S_{np} – площадь сечения проводника, α – угол подъема спирали. α_{me} – магнито-электрическая восприимчивость, используемая в материальных уравнениях для отдельной спирали:

$$\mathbf{p} = \varepsilon_0 \alpha_{ee} \mathbf{E} - j \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \alpha_{em} \mathbf{H},$$

$$\mathbf{m} = \alpha_{mm} \mathbf{H} + j \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \alpha_{me} \mathbf{E}.$$

Здесь α_{ee} и α_{mm} – тензоры диэлектрической и магнитной восприимчивости, $\alpha_{em} = \alpha_{me}^T$ – псевдотензор, характеризующий киральные свойства спирали, символ T означает транспонирование, ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные. При записи этих выражений полагается, что электрическое и магнитное поле являются монохроматическими, и их зависимость от времени описывается функцией $\exp(j\omega t)$, как принято в радиофизике [1].

В нашем случае удельное сопротивление меди $\rho = 1.673 \cdot 10^{-8}$ Ом·м [6], объемная концентрация электронов проводимости в меди определялась как $N_0 = \rho_m N_A / M$, где $\rho_m = 8920$ кг/м³ – плотность меди [6], N_A – число Авогадро, M – молярная масса меди.

Как следует из дисперсионных соотношений Крамерса – Кронига [7], в окрестности резонансной частоты действительная и мнимая части магнитоэлектрической восприимчивости спирали α_{me} являются величинами одного порядка. Следовательно, коэффициент ослабления электромагнитного поля внутри металлической спирали τ имеет одинаково значимые действительную и мнимую части. Одной из задач данного исследования является определение коэффициента τ , который связан с входным сопротивлением спирали. Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования (рисунок 3) позволяет найти значение комплексной

величины τ отдельной спирали и значение кирального параметра α_{me} для всего образца:

1) образец, содержащий левосторонние одновитковые спирали с углом подъема 35° – $\tau = 5.105 \cdot 10^{-5} + j \cdot 2.552 \cdot 10^{-5}$, $\alpha_{me} = -1.1 + j \cdot 2.2$;

2) образец, содержащий правосторонние одновитковые спирали с углом подъема 53° – $\tau = 12.48 \cdot 10^{-5} + j \cdot 2.495 \cdot 10^{-5}$, $\alpha_{me} = 1.1 - j \cdot 5.5$.

При этом доля скин-слоя в объеме спирали на резонансной частоте (3 ГГц) составляет $N_s = 4.754 \cdot 10^{-5}$.

Если скин-эффект является ярко выраженным и толщина скин-слоя значительно уступает линейным размерам сечения проводника, то поверхность проводника можно рассматривать как плоскую [7]. В этом случае для коэффициента τ справедливо следующее выражение [1]:

$$\tau = (1 + j) \sqrt{2\varepsilon_0 \rho \omega}.$$

В этом случае численное значение коэффициента τ для обоих образцов на резонансной частоте (3 ГГц) составляет $7.471 \cdot 10^{-5} + j \cdot 7.471 \cdot 10^{-5}$.

Определение данных параметров необходимо для проведения дальнейших исследований по созданию безотражательных покрытий, а также метаматериалов с отрицательным преломлением электромагнитных волн на основе спиральных элементов.

Используя значение комплексного параметра киральности κ' , можно определить частотную зависимость угла поворота плоскости

поляризации волны, прошедшей через структуру, для наблюдателя, смотрящего навстречу волне:

$$\varphi = \frac{1}{2} \frac{\omega}{c} \operatorname{Re}(\kappa') z_0,$$

где z_0 – толщина структуры (в нашем случае $z_0 = 2r$), $\operatorname{Re}(\kappa')$ – действительная часть комплексного параметра киральности [1].

Множитель $\frac{1}{2}$ в данной формуле учитывает

анизотропные свойства исследуемой искусственной структуры, в которой все спирали ориентированы вдоль одной оси. При этом киральные свойства структуры характеризуются тензором κ'_{ij} , все компоненты которого равны нулю, кроме компоненты κ'_{11} .

Полученная аналитически частотная зависимость угла поворота плоскости поляризации волны, прошедшей через искусственную структуру, показана на рисунке 3 штриховой кривой.

Если структура образована спиралями с левосторонним кручением ($q < 0$), то для частот, более низких по отношению к резонансной, получаем $\operatorname{Re}(\kappa') < 0$ и $\varphi < 0$. Таким образом, для этих частот имеет место поворот плоскости поляризации волны против часовой стрелки, если смотреть навстречу волне.

Сравнение экспериментальных графиков и результата моделирования зависимости угла поворота плоскости поляризации СВЧ волны при ее взаимодействии с образцами искусственной анизотропной двумерной решетки, состоящей из

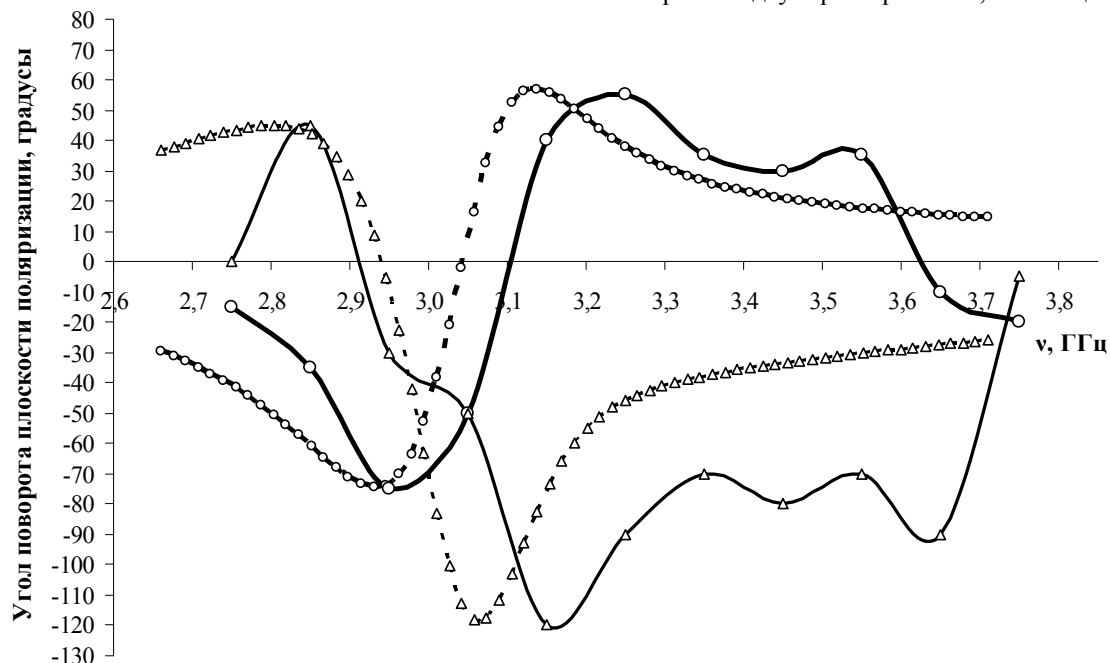


Рисунок 3 – Сравнение результатов экспериментального исследования и математического моделирования. Сплошной кривой показана экспериментальная зависимость угла поворота плоскости поляризации от частоты, штриховой – результат моделирования;

значком о обозначены кривые, относящиеся к образцу, состоящему из спиралей с углом подъема 35° , значком Δ – к образцу, состоящему из спиралей с углом подъема 53°

одновитковых металлических спиральных элементов с углом подъема 35^0 и 53^0 , позволяет сделать вывод, что предложенная модель качественно описывает свойства искусственной структуры с большой киральностью в СВЧ диапазоне. Направление поворота плоскости поляризации волны, рассчитанное на основании предложенной модели, соответствует направлению поворота, наблюдаемому во время эксперимента (рисунок 3). Полученное теоретически значение частоты, соответствующее изменению направления вращения плоскости поляризации на противоположное, совпадает, в пределах погрешности измерения, с экспериментальным результатом.

Заключение

На основе аналитического выражения для киральной восприимчивости, полученного ранее и апробированного в терагерцевом диапазоне частот [1], проведено моделирование киральных свойств изготовленных образцов искусственной структуры в СВЧ диапазоне. Из сравнения экспериментальных данных и результатов моделирования найдены значения коэффициента ослабления поля внутри отдельной металлической спирали и значение кирального параметра $a_{\text{те}}$ этой спирали, а также действительной части кирального параметра κ' всего образца. Показано, что предложенная модель качественно описывает свойства искусственной структуры с большой киральностью в СВЧ диапазоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование свойств искусственных анизотропных структур с большой киральностью / И.В. Семченко [и др.] // Кристаллография. – 2011. – Т. 56. – № 3. – С. 404–411.
 2. *Free-standing and overgrown InGaAs/GaAs nanotubes, nanohelices and their arrays* / V.Ya. Prinz [et al.] // Physica E. – 2000. – Vol. 6. – P. 828.
 3. *Fabrication of metamaterials on the basis of precise microand nanoshells* / E.V. Naumova [et al.] // In Proc. Metamaterials 2007, Rome, Italy. – 2007. – P. 74.
 4. *Terahertz-range chiral metamaterials based on helices made of metal-semiconductor nanofilms* / E.V. Naumova [et al.] // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2009. – Vol. 45, № 4. – P. 292.
 5. *Effective electron model of the wire helix excitation at microwaves: first step to optimization of pitch angle of helix* / I.V. Semchenko [et al.] // In Advances in Electromagnetics of Complex Media and Metamaterials. NATO Science Series II. – 2003. – Vol. 89. – P. 245–256.
 6. *Таблицы физических величин*. Справочник; под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
 7. *Ландау, Л.Д. Электродинамика сплошных сред* / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1982. – 620 с.
- Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ) – проект № Ф11МС-005.

Поступила в редакцию 07.09.11.